

На правах рукописи

Комаров Павел Юрьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ КОРРЕКЦИИ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО  
ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Специальность 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Московском техническом университете связи и информатики.

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Безруков Вадим Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Кукк Калью Иванович  
  
кандидат технических наук  
Алексеев Юрий Анатольевич

Ведущее предприятие: Открытое акционерное общество «Мощная  
аппаратура радиовещания и телевидения»  
(ОАО «МАРТ»)

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_ ч. на заседании диссертационного совета К219.001.02 в Московском техническом университете связи и информатики по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-455.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского технического университета связи и информатики.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Матвеева О.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Перед национальной промышленностью России в текущем периоде стоит задача освоения производства передающего и приемного оборудования по стандарту DVB. Отечественные производители такого оборудования должны выдержать конкуренцию на мировом рынке. Это определяет необходимость разработки эффективных методов и алгоритмов, обеспечивающих существенное увеличение качества изображений цифрового телевизионного (ТВ) вещания в вариантах оборудования, производимого в России. Соответственно актуальной задачей является разработка новых методов и устройств формирования и коррекции сигналов цифрового ТВ вещания, позволяющих увеличить эффективность работы указанных выше систем стандарта DVB за счет реального повышения качества передаваемых ТВ изображений и сопутствующих услуг. В связи с этим тема данной диссертационной работы является актуальной.

### **Цель и задачи работы**

Целью настоящей диссертационной работы является разработка эффективных методов и устройств коррекции искажений в системах цифрового вещательного телевидения, учитывающих специфику формирования, кодирования и преобразования сигналов по стандартам MPEG-2, DVB и обеспечивающих повышение качества функционирования элементов оборудования, используемых при передаче сигналов по каналам связи, а также разработка и моделирование алгоритмов, реализующих предложенные методы.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие научно-практические задачи:

1. Проведен анализ искажений формирования и преобразований сигналов ТВ изображений в системах цифрового телевидения.
2. Разработан метод устранения “блокинг-эффекта”.
3. Разработан метод коррекции линейных искажений сигналов в системах цифрового телевидения.
4. Разработан метод коррекции нелинейных искажений (типа “гребенка”), возникающих при передаче границ изображений, ориентированных во внутрикадровом пространстве в направлении, ортогональном направлению движения.
5. Разработан алгоритм текущего контроля сквозной частотной характеристики радиоканала в системах цифрового ТВ вещания по стандарту DVB-T.
6. Разработана методика анализа и выбора характеристик усилителей для цифрового ТВ вещания.

7. Проведены экспериментальные исследования разработанного метода устранения искажений типа “блокинг-эффекта”, создана программа, моделирующая процесс устранения “блокинг-эффекта”.

#### **Методы исследования**

При решении поставленных задач в работе использованы современные методы анализа теории радиотехники, включая элементы теории функций и функционального анализа, теории радиотехнических цепей, теории телевидения, теории численного интегрирования и дифференцирования, линейной алгебры и геометрии, методы спектрального анализа Фурье, численного анализа и программирования и др.

#### **Научная новизна работы**

Научная новизна настоящей работы заключается в следующем:

1. Проведен теоретический анализ характеристик, параметров и искажений формирования сигналов ТВ изображений в системах цифрового вещательного телевидения.
2. Разработан метод устранения “блокинг-эффекта”.
3. Разработан метод коррекции линейных искажений сигналов в системах цифрового телевидения.
4. Разработан метод коррекции нелинейных искажений типа “гребенка”.
5. Разработаны принципы и алгоритм текущего адаптивного контроля и соответственно коррекции сквозной частотной характеристики радиоканала в системах цифрового ТВ вещания по стандарту DVB-T.
6. Разработана методика анализа и выбора характеристик усилителей для цифрового ТВ вещания.
7. Создана программа, моделирующая процесс устранения “блокинг-эффекта”.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Проведённый анализ и учёт специфики влияния чересстрочной развёртки на качество передачи пространственной структуре телевизионных изображений позволили разработать способ и устройство кодирования сигнала изображения по стандарту MPEG-2 с предварительным подавлением нелинейных искажений при передаче границ изображений, соответствующих объектам с относительно быстрым движением в пространстве видеоконтроля. По данному способу и устройству получен (в соавторстве) патент на изобретение №2287909 от 20 ноября 2006 г. с приоритетом 15 декабря 2004 г.

В работе предложен адаптивный алгоритм оценки текущего состояния АЧХ сквозного радиоканала и восстановления информационных символов, применение

которого позволит увеличить качество функционирования систем наземного ТВ вещания по стандарту DVB-T.

Разработанные в диссертации метод устранения блокинг-эффекта, алгоритм модели устройства, программное обеспечение для моделирования, реализованное на языке Matlab, и полученные результаты экспериментального исследования показали целесообразность применения предложенного варианта устранения блокинг-эффекта в системах цифрового телевидения со сжатием спектра сигналов изображений по стандарту MPEG-2.

Теоретические и практические результаты работы использованы при проведении учебного процесса на кафедре телевидения им. С.И. Катаева МТУСИ, при выполнении НИР в лаборатории “Цифровой обработки телевизионных сигналов” (НИЛ-11) НИЧ МТУСИ и в ОАО «МАРТ», Санкт-Петербург.

Основные положения, теоретические выводы и рекомендации, представленные в материалах данной диссертационной работы, получены автором самостоятельно.

#### **Апробация результатов работы**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно – технических конференциях профессорско-преподавательского состава, МТУСИ, Москва, 2004-2006 г.г.

#### **Публикации**

Материалы диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, отражены в заявке на изобретение “Способ преобразования цифрового сигнала изображения и устройство для его реализации” по которой получен патент на изобретение №2287909 от 20 ноября 2006 г. с приоритетом 15 декабря 2004 г., и представлены в отчетах по НИР НИЛ-11 НИЧ МТУСИ.

#### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на страницах машинописного текста. Список литературы включает 114 наименований.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты анализа искажений формирования сигналов ТВ изображений в системах цифрового вещательного телевидения.
2. Разработанный метод устранения “блокинг-эффекта”.
3. Разработанный метод и устройства коррекции линейных искажений сигналов в системах цифрового телевидения.

4. Разработанный метод и устройство коррекции нелинейных искажений типа «гребенка».
5. Разработанный алгоритм контроля текущего состояния сквозной частотной характеристики радиоканала в системах цифрового ТВ вещания по стандарту DVB-T.
6. Методика анализа и выбора характеристик усилителей для цифрового ТВ вещания.
7. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода устранения “блокинг-эффекта”.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы настоящей диссертационной работы, показано состояние исследуемого вопроса, определены цель, задачи и методы исследований. Сформулирована научная новизна, практическая значимость результатов работы и положения, выносимые на защиту. Представлены состав и краткое описание работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

**В первой главе** «Международный стандарт кодирования с информационным сжатием MPEG-2» проанализированы особенности преобразования и кодирования видеoinформационных сигналов при сжатии спектра статических и динамических ТВ изображений.

При реализации сжатия по стандарту MPEG учитывается следующее:

1. В структуре пространственно-временного спектра независимых фрагментов текущих ТВ изображений может быть существенно ограничена точность передачи высокочастотных составляющих (ВЧ).
2. Квантование коэффициентов пространственного спектра позволяет адаптивно снижать точность передачи малоинтенсивных и ВЧ составляющих в пределах соответствующих фрагментов, относительный вклад которых в содержание ТВ изображения не является существенным.
3. При переходе к пространственному спектру фрагментов эффективно решается вопрос декорреляции ТВ изображения и обеспечивается реализация статистического кодирования.

Начальный этап процесса кодирования содержит преобразование (ДКП) матрицы отсчётов изображения  $X$  в матрицу коэффициентов  $Y=F(X)$ . Декодирование осуществляется применением обратного преобразования:  $\hat{X} = F^{-1}(\hat{Y})$ .

В самом общем случае процесс квантования - это осуществление нелинейного преобразования, характеристика которого имеет вид монотонной ступенчатой функции:

$Q = \text{round}\left(\frac{Y}{k}\right)$ , где  $\text{round}(\cdot)$  – операция округления результата до ближайшего целого;  $k$  –

коэффициент преобразования. Деквантование можно представить в виде  $\hat{Y} = kQ$ .

После квантования компоненты преобразований группируются в определённой последовательности, а затем кодируются хатфмановским или арифметическим кодерами. В результате такого кодирования квантованная последовательность компонент, являющаяся последовательностью двоичных символов  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_i\}$ , трансформируется в кодированную последовательность  $C_k = \{c_1, c_2, \dots, c_j\}$ , для которой  $i > j$ , т.е.  $C_k$  содержит меньшее число двоичных символов, например, для последующей передачи их по каналу связи. Таким образом, существенно устраняется статистическая избыточность в последовательности символов, получаемой после энтропийного кодирования.

При этом дискретные участки общего ТВ изображения, попадающие в пределы независимых блоков (фрагментов)  $8 \times 8$  отсчётов (пикселей), в общем случае представляют собой суперпозицию независимых структурных составляющих, функции распределения пространственных спектров которых могут существенно отличаться по уровню и протяжённости. Реализация преобразования общего спектра блока по стандарту MPEG-2 отражается в таком случае неэквивалентностью изменений параметров функций спектров отдельных составляющих. Весьма существенно деградирует спектр составляющих, имеющих в пространстве блока низкую интенсивность и протяжённость (площадь), что обуславливает ещё большее снижение относительного веса (доли) их спектра в общей его структуре. Сама операция квантования спектра таких составляющих сопровождается не только резким изменением (нелинейного типа) характера огибающей спектра, но и значительным уменьшением его объёма. Фактически их спектральные компоненты сохраняются лишь на тех частотах, где коэффициенты суммарного спектра превышают заданный порогом квантования уровень. В результате в пределах отдельных блоков имеют место перекрёстного типа искажения между спектрами независимых составляющих. В связи с последним резко расширяется набор возможных искажений и дефектов изображений в пределах блока при увеличении степени сжатия. При этом эквивалентность структуры ТВ изображений в смежных блоках может приводить к возрастанию во внутрикадровом пространстве протяжённости однотипных искажений и соответственно к существенному увеличению их заметности. Не менее заметны искажения (ступенчатого типа) при передаче низкоградиентных изменений фона. Эти

изменения отражаются гармониками спектра низкого уровня, которые подавляются при реализации квантования.

Характерными для сжатия по стандарту MPEG-2 являются искажения изображений движущихся объектов, которые возникают на границах, ортогональных направлению движения. С изменением положения границы в смежных кадрах сопряжено последовательные (в межкадровом направлении) изменения искажений структуры изображения в пределах ансамбля блоков, отражающих передачу данной границы. Такие изменения качества передачи границы проявляются возникновением низкочастотных пульсаций составляющих её изображения, частота которых зависит также от скорости движения проекции объекта во внутрикадровом пространстве. Кроме того, для сжатия по стандарту MPEG-2 свойственно появление ряда других искажений, обусловленных, например, неточностью оценки сигнала вектора движения, зависимостью их величины от положения деталей изображения по отношению к структуре блоков, пространственно-ступенчатой аппроксимацией деталей изображений, сопоставимых по размеру с блоком, укрупнением протяжённости помех по межкадровому направлению и т.д. Коррекция выявленных искажений сжатия, особенно на этапе декодирования, является существенным резервом для увеличения качественных характеристик и эффективности функционирования систем вещательного цифрового телевидения. Результаты данного раздела позволили конкретизировать отдельные направления коррекции искажений изображений, обусловленных сжатием спектра по стандарту MPEG-2.

**Во второй главе** «Разработка методов коррекции линейных искажений сигналов в системах цифрового телевидения» проанализированы пространственные импульсные характеристики (ИХ) изотропного оптического тракта систем телевидения, линейные искажения сигналов в системах цифрового телевидения со сжатием по стандарту MPEG-2 и характеристики ортогональной дискретизации, разработан способ коррекции и антишумовой обработки в системах телевидения.

Полученные здесь соотношения показали, что эквивалентная протяжённость ИХ существенно увеличивается с возрастанием расстояния во внутрикадровом пространстве по отношению к оптической оси оптической системы (ОС). Согласно расчётным оценкам, с увеличением расстояния от центра ОС, примерно, вдвое более, чем в два раза, уменьшается амплитуда и возрастает протяжённость относительной ИХ, полученной расчётным путем.

В связи с тем, что на краях раstra имеет место более высокая степень подавления высокочастотных составляющих пространственного спектра в ОС, то кодирование по методу JPEG обуславливает возникновение мозаичного эффекта в блочной структуре в краевых областях раstra, где мелкие детали в структуре ТВ изображений преобразуются в



пределах блока или изменяют уровень постоянной составляющей. В реальных изображениях на краях раstra увеличивается при этом вероятность возникновения обрамления границ и заметной блочной структуры, особенно, с увеличением степени сжатия.

В системах цифрового телевидения входное видеoinформационное воздействие подвергается многочисленным преобразованиям. Схема формирования сигнала изображения в преобразователе “свет-сигнал” ТВ системы показана на рис. 1. Первоначально входное видеoinформационное воздействие попадает в ОС, которая работает как пространственный фильтр низких частот. Из-за действия операторов ограничения на входное видеoinформационное воздействие в ОС имеют место амплитудно-пространственные и амплитудно-частотные преобразования в реальной и спектральной областях. Одними из важных операторов, действующих во входной части ОС, являются низкочастотные в пространстве операторы мультипликативного типа. Рассмотрено влияние операторов такого вида на структуру оптического воздействия.

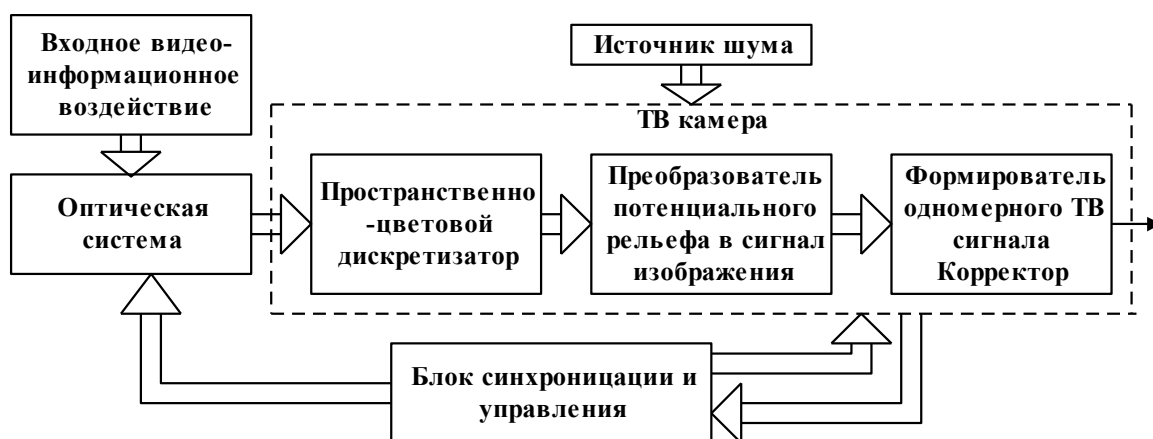


Рис. 1. Схема формирования сигнала в преобразователе “свет-сигнал”

Воздействие на входе ОС представлено в виде суммы средней и переменной составляющих:  $O(x, y, t) = F_0 + F(x, y, t)$ , где  $F_0$  - средняя составляющая воздействия, а  $F(x, y, t)$  - его переменная составляющая.

Для случая статического во времени варианта работы общий коэффициент передачи ОС является функцией, которая зависит от аргументов  $x, y$  и пространственных частот  $\omega_x, \omega_y$  и может быть определён произведением:  $K_{ПОС} = K_{ОС}(x, y) \cdot K_{ПЧХ}(x, y, \omega_x, \omega_y) \cdot e^{-j\varphi(\omega_x, \omega_y)}$ , где  $K_{ОС}(x, y)$  - зависимость коэффициента передачи от координат  $x, y$  в плоскости изображений;  $K_{ПЧХ}(x, y, \omega_x, \omega_y)$  - зависимость коэффициента передачи от пространственной частоты в точке плоскости изображения с координатами  $x, y$ ;  $\varphi(\omega_x, \omega_y)$  - фазовая характеристика

ОС. При  $\omega_x \rightarrow 0$  и  $\omega_y \rightarrow 0$  величина  $K_{П\text{ОС}}$  практически определяется изменениями  $K_{\text{ОС}}(x, y)$  в плоскости изображения, т.е.  $K_{П\text{ОС}} \approx K_{\text{ОС}}(x, y)$ .

Тогда воздействие на выходе ОС описывается выражением:

$$O_{П}(x, y, t) = O(x, y, t) \cdot K_{\text{ОС}}(x, y) = F_0 \cdot K_{\text{ОС}}(x, y) + F(x, y, t) \cdot K_{\text{ОС}}(x, y). \quad (1)$$

Обозначим (соотношение (1)) спектр функции  $K_{\text{ОС}}(x, y)$  как  $S_k(\omega_x, \omega_y)$ , а спектр функции  $F(x, y, t)$  как  $V(\omega_x, \omega_y, \omega)$ . Тогда результирующий спектр воздействия на выходе ОС отражается следующим образом:

$$S_{П}(\omega_x, \omega_y, \omega) = F_0 \cdot S_k(\omega_x, \omega_y) + V(\omega_x, \omega_y, \omega) \otimes S_k(\omega_x, \omega_y). \quad (2)$$

Первая составляющая выражений (1,2) иллюстрирует появление низкочастотных искажений фона, а вторая - интегрального усреднения (искажений) тонкой структуры спектра видеоинформационного воздействия. Чем шире спектр пространственной неравномерности коэффициента передачи ОС, тем больше степень указанных интегральных искажений пространственного спектра видеоинформации, обусловленных влиянием ОС. Искажения могут быть устранены коррекцией в электрическом тракте, но сохраняется сопутствующее данному фактору ухудшение отношения сигнал/шум, связанное с неэффективным использованием на краях внутрикадрового пространства реального амплитудного диапазона преобразователей “свет-сигнал”.

Из-за низкочастотных искажений фона телевизионного изображения на совокупность смежных блоков накладываются низкоградиентные изменения сигнала фона по всем направлениям внутрикадрового пространства. Интенсивность соответствующих спектральных составляющих не является высокой и зависит от точности компенсации аддитивных искажений в ТВ камерах. К сожалению, высокая точность компенсации обычно достигается в современных преобразователях “свет-сигнал” лишь для фиксированной освещенности сцены. Изменения средней освещенности по отношению к данному уровню в реальных условиях обуславливает нарушение точности компенсации во внутрикадровом пространстве, что проявляется возникновением участков фона с низкоградиентными изменениями уровня во внутрикадровом пространстве по отношению к среднему (интегральному) варианту компенсирующего сигнала. В результате появляются низкочастотные, по отношению к среднему уровню, изменения фона по фазе, т.е. «колебательного» типа при фиксированной освещенности сцены.

Составляющие пространственного спектра, отражающие эти изменения, отличаются по уровню в смежных блоках. Для фиксированной степени сжатия по стандарту JPEG характерно полное пороговое подавление аддитивных низкочастотных составляющих спектра в тех областях внутрикадрового пространства, для которых характерно наличие экстремумов функций

остаточных аддитивных искажений. В пределах таких областей и может возникать ложная граница относительно большой протяжённости, связанная со спецификой кодирования по стандарту JPEG и обусловленная, в частности, полным подавлением второй, третьей и т.д. гармоник низкочастотных составляющих. Большая её протяжённость во внутрикадровом пространстве определяет увеличение заметности подобного типа искажений.

Следовательно, цифровое вещательного телевидения диктует ужесточение требований к ТВ камерам по точности компенсации фоновых искажений. При этом используемые методы компенсации не должны приводить к появлению ложных, протяженных или локальных экстремумов в структуре фона. С другой стороны, должны быть разработаны методы целенаправленной компенсации блочной структуры, возникающей в подобных участках внутрикадровой структуры текущих ТВ изображений. В системах цифрового вещательного телевидения нелинейные преобразования (блочная фрагментация изображения, независимое ДКП с подавлением высокочастотных пространственных составляющих в структуре изображения блоков и др.) определяют также появление эффекта укрупнения шумовой структуры изображения, что, при внутрикадровом сжатии, увеличивает вероятность возникновения ложных границ в смежных блоках. Соответственно, возникает необходимость более жесткого подавления шумовых составляющих перед сжатием по стандарту MPEG-2 (MPEG-4).

Последующий раздел второй главы соответствует посвящён разработке способа коррекции и антишумовой обработки сигнала изображения в системах телевидения. В современных преобразователях “свет-сигнал” применяется коррекция апертурных искажений, которая обеспечивает увеличение качества изображений за счет увеличения эффективности передачи высоких пространственных частот. Однако данная коррекция выполняется на выходе ТВ преобразователя “сигнал-свет” и приводит к увеличению вклада и шумовых составляющих.

Предлагаемый метод коррекции состоит в разделении сигнала на две составляющие: низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ), причем первую из них не подвергают обработке, а вторую подвергают коррекции и антишумовой обработке, с последующим сложением сигналов двух составляющих.

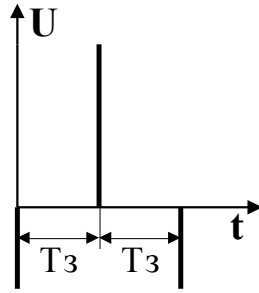


Рис. 2. Импульсная характеристика устройства выделения ВЧ

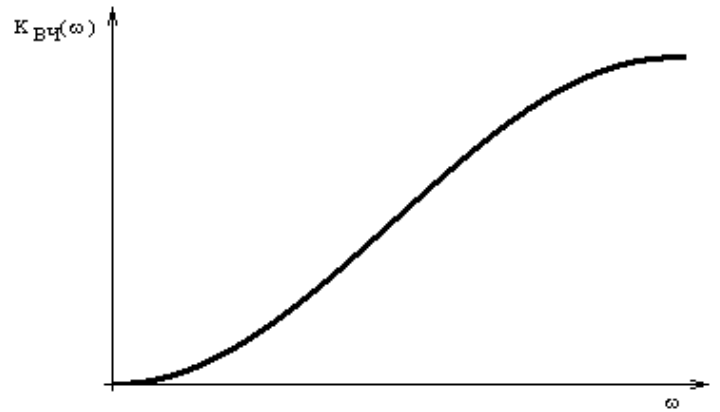


Рис. 3. АЧХ устройства выделения ВЧ

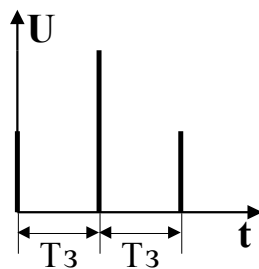


Рис. 4. Импульсная характеристика устройства выделения НЧ

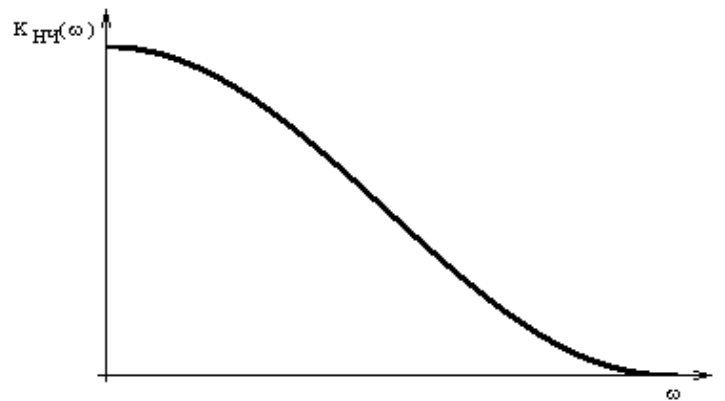


Рис. 5. АЧХ устройства выделения НЧ

Импульсные характеристики устройств выделения ВЧ и НЧ показаны на рис. 2 и 4. Амплитудно-частотные характеристики устройства выделения определяются выражениями:  $|K(\omega)| = |\cos(\omega T_3) - 1|$  и  $|K(\omega)| = |\cos(\omega T_3) + 1|$  и показаны на рис. 3 и 5.

Последовательность действий при предлагаемой обработке иллюстрирует рис. 6.

Для эффективной коррекции и антишумовой обработки сигнала, предлагается производить выделение ВЧ, текущее интегрирование ВЧ (вертикально ориентированных во внутрикадровом пространстве составляющих) сигнала изображения в вертикальном направлении. В результате последней операции повышается отношение сигнал/шум за счет корреляции сигналов смежных строк ТВ изображения.

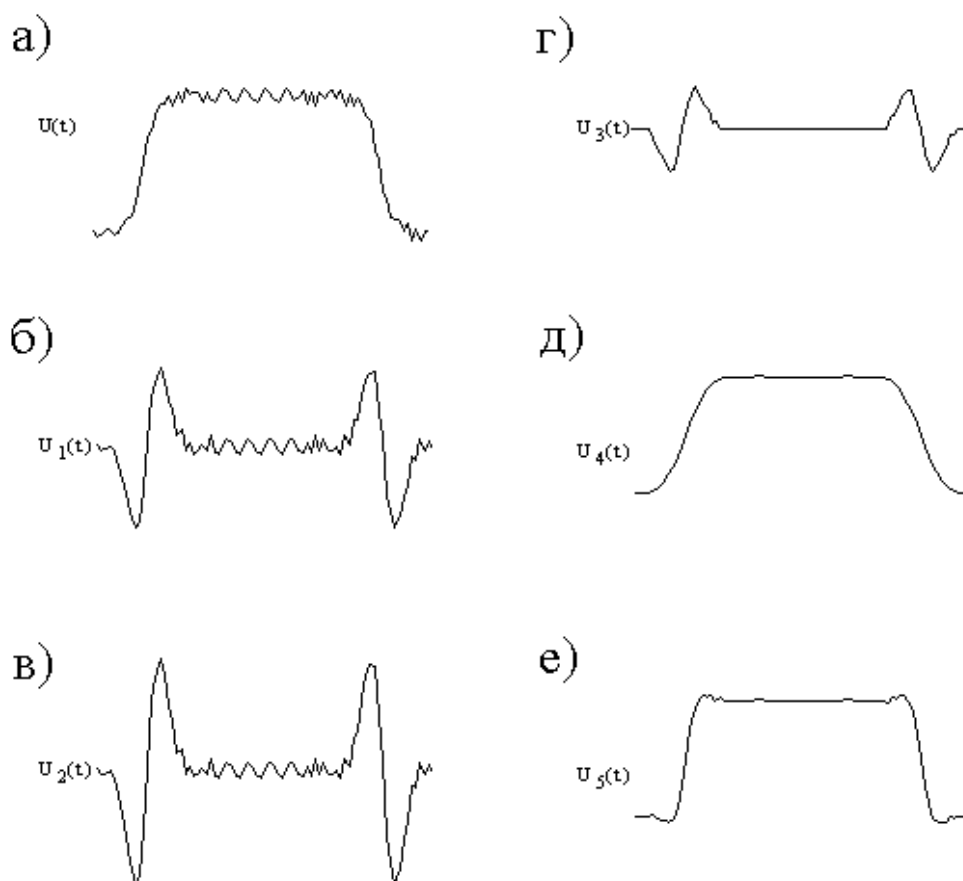


Рис. 6. Последовательность операций обработки сигнала изображения при коррекции:  
 а) исходный, зашумленный сигнал;  
 б) высокочастотная составляющая сигнала;  
 в) результат сложения высокочастотных составляющих сигналов двух соседних строк;  
 г) сигнал после проведения пороговой обработки и интегрирования;  
 д) низкочастотная составляющая сигнала;  
 е) результирующий сигнал на выходе устройства коррекции и антишумовой обработки.

Далее, полученный сигнал ВЧ подвергают пороговой обработке для устранения шумовой составляющей, производится низкочастотная фильтрация данного сигнала. Подвергнутый обработке сигнал ВЧ складывается с выделенным сигналом НЧ. На следующем этапе необходимо проводить аналогичную обработку во внутрикадровом пространстве в вертикальном по растру направлении (обрабатываются столбцы).

Предложенный способ позволяет, наряду с коррекцией сигнала изображения, уменьшить влияние шумов. В системах цифрового ТВ поэтому целесообразно использовать разработанный вариант нелинейного устранения шумовых составляющих в исходном (до сжатия) сигнале изображения.

**Третья глава** «Разработка метода устранения «блокинг-эффекта» посвящена его разработке, обоснованию выбора узлов интерполяции и области усреднения при реставрации структуры фона.

Для устранения “блокинг-эффекта” (блочности) первоначально выделяют во внутрикадровом пространстве области изображения, в которых присутствуют совокупности фоновых блоков, т.е. блоков с низкоградиентными изменениями сигнала в смежных пикселях. После этого в пределах указанной совокупности определяется местоположение узлов интерполяции, в качестве которых используются виртуальные точки внутри каждого блока. Выбранные узлы являются опорными для интерполяции пикселей всей области изображения, определенной как фоновая. По отношению к ним в данной области вычисляются значения уровней всех пикселей.

Проведённые исследования показали, что при фиксированных значениях степени сжатия по стандарту MPEG и контрастности точки по отношению к фону искажения её изображения имеют наибольшее значение в центральной области блока по отношению к, например, варианту её расположения на граничных элементах блока. В связи с этим в качестве узлов интерполяции и области, в которой производится усреднение данных, использованы граничные элементы блока. При этом равномерная сетка узлов упрощает интерполяцию. Вместе с этим, область, в которой производится усреднение данных, для присваивания значений узлам интерполяции, охватывает относительно большое количество пикселей изображения, что снижает воздействие локальных шумовых выбросов при вычислении уровня узлов интерполяции.

В качестве координат узлов интерполяции предложено выбрать виртуальные точки в центре каждой четверти блока, а области усреднения данных для получения уровня узлов интерполяции - два крайних ряда пикселей по периметру блока (рис.7). При этом уровень узла определяется результатом усреднения значений пикселей, расположенных в соответствующей четверти блока.

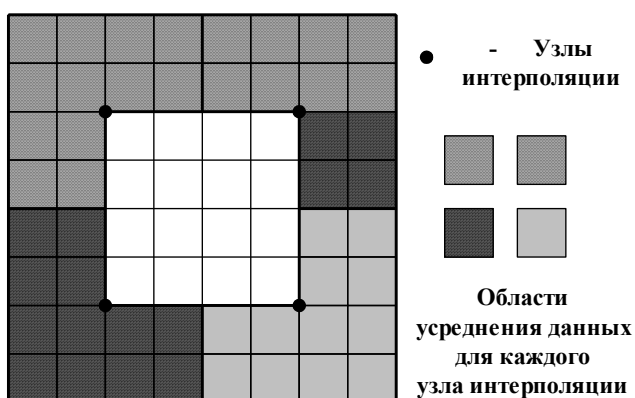


Рис. 7. Расположение узлов интерполяции и областей усреднения данных

Для интерполяции значений пикселей изображения предложено использовать кусочно-квадратичную интерполяцию, преимуществом которой по отношению к варианту сплайн-интерполяции является возможность устранения эффекта “блочности” и на участках изображения, не имеющих прямоугольной формы.

Интерполяционная формула в таком

случае имеет вид:

$$Z_i(x, y) = a_i x^2 + b_i y^2 + c_i xy + d_i. \quad (3)$$

Для случая равномерной сетки узлов получены конкретные соотношения, позволяющие вычислять коэффициенты  $a_i, b_i, c_i, d_i$  формулы (3) для каждой отдельной области интерполяции, ограниченной линиями, соединяющими узлы интерполяции.

**В четвертой главе** «Анализ и коррекция искажений формирования и передачи сигналов изображений в системах цифрового вещательного телевидения» разработан метод коррекции нелинейных искажений типа “гребенка”, реализован анализ интерференции радиосигналов, пришедших в точку приема с разными задержками, разработан алгоритм оценки текущего состояния амплитудно-частотной характеристики сквозного радиоканала и предложена методика анализа (выбора) характеристик усилителей для цифрового ТВ вещания.

Из-за чересстрочной структуры раstra возникают специфические искажения границ движущихся объектов, вызванные различным положением движущихся объектов в смежных полях одного кадра изображения. Эти специфические искажения носят нелинейный характер и получили упрощенное название “гребенка” или “расческа”. Следствием появления подобного искажения в кадре является отсутствие возможности получать четкое изображение границ подвижного объекта в режиме “стоп-кадр”, а также снижение потенциально возможной величины коэффициента сжатия спектра изображения при кодировании по стандарту MPEG. Причиной последнего является интегрирование в пределах блоков неполного числа строк, отражающих изображения границ быстродвижущихся объектов в направлении, ортогональном направлению движения.

В предлагаемом в диссертации методе устранения вышеуказанных нелинейных искажений типа “гребенка” обеспечивается за счет вычисления и последующего вычитания из пространства четного (или нечетного) поля составляющих сигнала временной разности. Для определения сигналов пространственной разности, соответствующих горизонтальным границам неподвижных деталей изображения, и формирования необходимого сигнала управления предлагается сигнал текущего поля смещать в вертикальном в пространстве раstra в направлении относительно опорного положения в пространстве раstra на  $\pm 2$  строки и вычитать соответствующие сигналы смещенных полей из опорного. Стробированием из сигнала пространственно-временной разности выделяют сигнал, соответствующий временной разности. Полученный сигнал временной разности вводится только в сигнал четного поля, т.е. через одно поле. В результате этого компенсируются составляющие движения и при формировании кадра изображения будут отсутствовать искажения в виде “расчески” подвижных элементов изображения. Обработанные таким способом нечетные и четные поля изображения

преобразуют в соответствующие кадры изображения, которые далее кодируют, например, по стандарту MPEG.

Во втором и третьем параграфах данной главы анализируется специфика многолучевого приёма в DVB-T. Показано, что средняя частота “гребенчатого” типа пульсаций в уровне амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) существенно возрастает с увеличением разницы в относительной задержке радиосигналов, а глубина режекции АЧХ - при сравнимых уровнях указанных составляющих. Следовательно, в условиях равенства уровней нескольких составляющих может резко деградировать качество приёма из-за полного подавления в пределах частотной оси, например, отдельных из непрерывных пилот-сигналов.

Далее в четвертой главе предлагается адаптивный алгоритм оценки текущего состояния АЧХ сквозного радиоканала и восстановления информационных символов. Преимуществом систем наземного ТВ вещания по стандарту DVB-T является применение модуляции COFDM (Coded Orthogonal Division Multiplexing), которая специально разработана для борьбы с помехами при многолучевом приеме.

В кадре COFDM совместно с информационными данными передаются опорные сигналы (распределенные и непрерывные пилот-сигналы), параметры и структура которых известна приёмнику, а также несущие сигналы параметров передачи. В частности, передаваемые непрерывные и распределенные пилот-сигналы позволяют на приемной стороне с ограниченной точностью вычислить изменения результирующей АЧХ и с применением интерполяционных методов скомпенсировать ее искажения. В материале диссертации предложен адаптивный алгоритм оценки текущего состояния АЧХ сквозного радиоканала и восстановления информационных символов.

В текущем времени оценивается характер и степень изменений (от символа к символу) АЧХ радиоканала. В отсутствии значительных изменений АЧХ радиоканала происходит накоплению опорных несущих по нескольким символам OFDM, пока степень изменений АЧХ не выйдет за пределы заданного порога. Восстановление информационных символов производится в этом случае по накопленным за время отсутствия значительных изменений АЧХ пилот-сигналам и имеет высокую точность за счет относительно высокой частоты следования опорных несущих в пространстве “частота – время”. В случае же появления значительных (превышающих заданное пороговое значение) изменений АЧХ во времени, прекращается накопление опорных несущих и осуществляется переход на вариант работы в пределах одного/двух или более символов OFDM, когда накопление практически отсутствует и восстановление происходит с использованием текущих опорных несущих.



Для восстановления информационных символов предложено использовать как частотную (при фиксированном времени) так и временную (при фиксированной частоте) интерполяцию с определенным весовым сочетанием результатов обоих вариантов интерполяции. При этом изменения весового сочетания результатов фактически определяются в текущем времени производными функции, отражающей зависимость уровня опорных несущих по направлениям частоты и времени. В случае, например, когда степень изменения опорных несущих во времени превышает заданный порог, возможно использование только результата интерполяции по частотному направлению, а при уменьшении динамических изменений АЧХ радиоканала возрастает вклад результатов интерполяции по временному направлению.

В связи с тем, что для разработанного алгоритма в общем случае характерным является неравномерное расположение узлов, то в данном разделе работы восстановление информационных сигналов предлагается осуществлять с применением интерполяционной формулы Ньютона.

В случае отсутствия выраженных изменений АЧХ радиоканала во времени в пределах 68 символов OFDM (кадр OFDM) осуществляется переход к укрупненному алгоритму адаптивной оценки текущего состояния АЧХ сквозного радиоканала и восстановления информационных символов. Здесь снова оценивается степень изменений АЧХ сквозного радиоканала во времени. Далее, в зависимости от результатов оценки, либо сразу производится восстановление информационных символов, либо при допустимой степени (скорости) изменений АЧХ во времени производится накопление опорных сигналов 2, 3 или 4 кадров OFDM и восстановление информационных символов кадра OFDM с учетом всей полученной информации о текущем состоянии радиоканала. Следовательно, при отсутствии выраженных (выше порога) изменений во времени АЧХ сквозного радиоканала восстановление информации осуществляется с использованием всех рассредоточенных опорных несущих, накопленных за 4 кадра OFDM (рис.8).

Такой вариант обеспечивает максимально возможную точность восстановления (интерполяции) АЧХ. Кроме этого, в данном случае выполняется условие равномерности расположения узлов интерполяции, что даёт возможность восстановления АЧХ в ячейках пространства “частота-время”, совпадающих по координатам с информационными несущими, с использованием упрощенных интерполяционных формул.

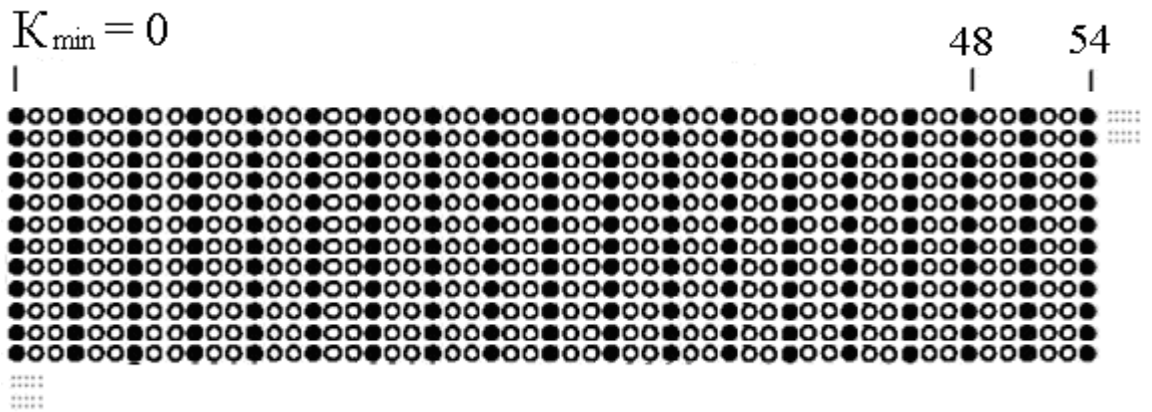


Рис. 8 Отсутствие изменений АЧХ во времени и накопление опорных несущих

Разработанный адаптивный алгоритм восстановления информационных символов позволяет эффективно использовать ресурсы структуры кадра OFDM в различных условиях приема пользователем DVB-T сигнала и типах радиоканалов и имеет потенциальные возможности по его доработке при учете специфики локального изменения анализируемых пилот-сигналов по различным в пространстве “частота-время” фиксированным направлениям. К тому же, в каждой локальной области указанного пространства следует определять эффективный вариант весовой обработки результатов интерполяционного восстановления АЧХ, выполненного по выбранным ортогональным направлениям в частотно-временном пространстве.

Для излучаемого радиосигнала DVB-T характерно появление высокоградиентных изменений уровня, значительно превышающих его среднее, в пределах динамического диапазона, значение. В текущем режиме работы передатчика при этом имеют место относительно кратковременные, но значительные по амплитуде пульсации выходного радиосигнала. Из-за нелинейности амплитудной характеристики выходного усилителя может при этом существенно искажаться его текущий спектр. В связи с этим в работе предложена методика анализа и выбора формы указанных характеристик.

Ограниченное по протяженности гармоническое колебание с амплитудой, равной  $A$  (использовано в качестве исходного сигнала на входе усилителя) аппроксимируют с помощью совокупности прямоугольных функций следующим образом:

$$u(t) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^K Ay \left( \text{rect} \frac{t-t_0-nT}{x_k} - \text{rect} \frac{t-t_0-T/2-nT}{x_k} \right). \quad (4)$$

Здесь  $x_k = \frac{T}{2} - \frac{2 \arcsin(ky)}{\omega_c}$  - длительность прямоугольного импульса,  $t_c$  - длительность аппроксимируемого сигнала,  $T = \frac{2\pi}{\omega_c}$  - период аппроксимируемого сигнала,  $t_0$  - сдвиг во времени аппроксимируемого сигнала,  $N = \frac{t_c}{T}$  - количество периодов аппроксимируемого сигнала,  $y$  - амплитуда прямоугольного импульса,  $K = \frac{1}{y}$  - количество прямоугольных импульсов, необходимых для аппроксимации одного (положительного или отрицательного) лепестка аппроксимируемого сигнала.

Спектральные плотности, соответствующие исходному и сигналу (4), определяются соотношениями:

$$S(\omega) = \frac{A}{2} t_c e^{-i\omega t_0} \left[ \frac{\sin\left(\left(\omega - \omega_{\tilde{n}}\right) \cdot t_c / 2\right)}{\left(\omega - \omega_{\tilde{n}}\right) \cdot t_c / 2} e^{-i\omega_c t_0} + \frac{\sin\left(\left(\omega + \omega_{\tilde{n}}\right) \cdot t_c / 2\right)}{\left(\omega + \omega_{\tilde{n}}\right) \cdot t_c / 2} e^{-i\omega_c t_0} \right],$$

$$S(\omega) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^K Ay \cdot x_k \frac{\sin(\omega \cdot x_k / 2)}{\omega \cdot x_k / 2} \left( e^{-i\omega(t_0+nT)} - e^{-i\omega(t_0+T/2+nT)} \right). \quad (5)$$

Для получения спектральной плотности результирующего сигнала на выходе усилителя следует просто умножить во втором выражении (5) амплитуды ( $Ay$ ) аппроксимирующих составляющих на весовые коэффициенты, значения которых дискретно отражают изменения усиления в зависимости от уровня входного сигнала.

$$S_{\hat{a}\hat{a}\hat{\delta}}(\omega) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^K (u(kAy) - u((k-1)Ay)) \cdot Ay \cdot x_k \frac{\sin(\omega \cdot x_k / 2)}{\omega \cdot x_k / 2} \left( e^{-i\omega(t_0+nT)} - e^{-i\omega(t_0+T/2+nT)} \right).$$

Отличия спектральных характеристик входного и выходного аппроксимированных сигналов обусловлено действием нелинейности амплитудной характеристики.

Разработанная методика позволяет выявлять влияние различных вариантов формы амплитудных характеристик усилителей на параметры спектра выходного сигнала и с учётом полученных результатов обеспечить заданные к ним требования.

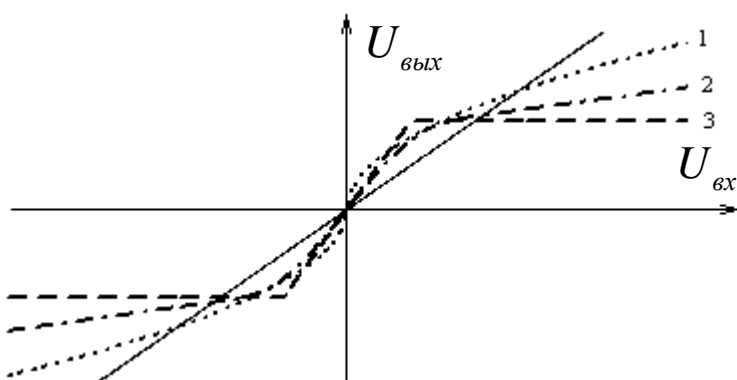


Рис. 9. Варианты амплитудных характеристик усилителей

На рис. 9 показаны несколько графиков с вариацией по отношению к идеальному (сплошная линия) формы амплитудных характеристик усилителей.

Нормируя спектральные плотности можно выбрать оптимальную амплитудную характеристику усилителя, обеспечивающую минимизацию влияния нелинейных искажений на спектр выходного сигнала. Из выбранных для анализа характеристик этому условию удовлетворяет первая, которая дает минимальный уровень сопутствующих нелинейному усилению гармонических составляющих, и, таким образом, обеспечивает минимизацию влияния нелинейных искажений.

**В пятой главе** «Результаты разработки устройств коррекции линейных и нелинейных искажений изображений в системах цифрового вещательного телевидения» разработаны в соответствии с предлагаемыми методами и алгоритмами коррекции устройства, приведены результаты разработки программного обеспечения для моделирования устранения «блокинг-эффекта» и экспериментальных исследований.

В первом разделе пятой главы, в частности, представлены результаты разработки способа и устройства кодирования сигнала изображения по стандарту MPEG-2 с предварительным подавлением нелинейных искажений при передаче границ изображений, соответствующих объектам с относительно быстрым движением в пространстве видеоконтроля. По данным способу и устройству получен патент на изобретение №2287909 от 20 ноября 2006 г. с приоритетом 15 декабря 2004 г.

Второй раздел данной главы посвящён результаты разработки устройства коррекции и антишумовой обработки сигнала изображения. Полная его схема состоит из последовательно включённых устройств, представленных на рис.10.

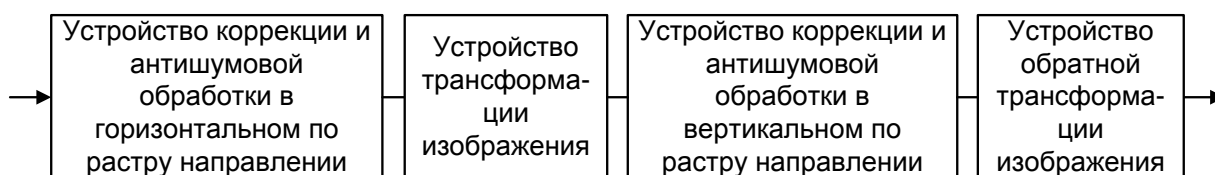


Рис. 10. устройство коррекции и антишумовой обработки сигнала изображения

На рис. 11 изображена схема устройства коррекции и антишумовой обработки в горизонтальном во внутрикадровом пространстве направлении. Устройство работает следующим образом.

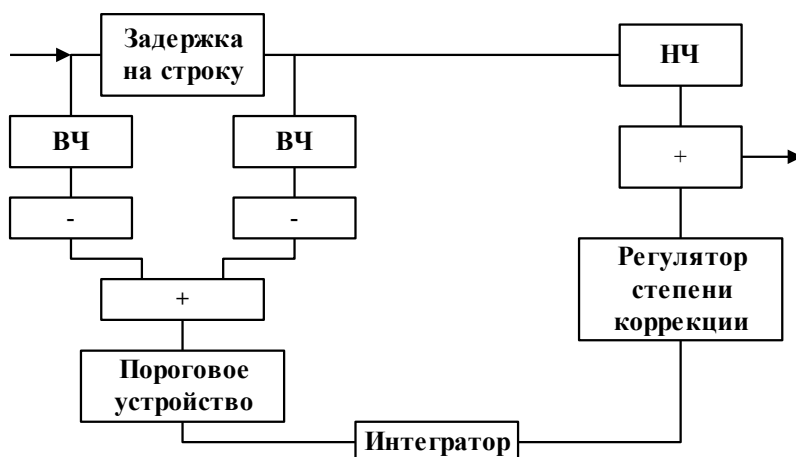


Рис. 11. Схема устройства коррекции и антишумовой обработки сигнала изображения в горизонтальном во внутрикадровом пространстве направлении

Сигнал, поступающий на устройство, задерживают на время строки, из исходного и задержанного сигналов выделяют, с помощью устройств внутрикадровой цифровой фильтрации, ВЧ и НЧ составляющие. Сигналы ВЧ инвертируют и подключают к сумматору. В сумматоре одномерные ВЧ-составляющие

горизонтальной коррекции усредняются в вертикальном (в пределах внутрикадрового пространства) направлении. С выхода сумматора результирующий сигнал поступает в пороговое устройство, где подвергается пороговому ограничению по минимальному уровню. При этом на фоновых участках полностью подавляются шумовые составляющие и низкоуровневые участки (в пределах полного амплитудного диапазона) полезной составляющей. Далее сигнал попадает на интегратор, где производится низкочастотная фильтрация (усреднение вертикальной ВЧ составляющей в горизонтальном направлении), обеспечивающая реставрацию низкоуровневых участков полезной и дополнительное подавление шумовой составляющих.

Интегрирующее устройство и устройство выделения низкочастотной составляющей отличаются лишь шириной полосы фильтрации. У интегрирующего устройства, в идеальном случае, должна быть более широкая полоса пропускания, и, таким образом, меньшее время задержки, чем у устройства выделения низкочастотной составляющей.

Полученный сигнал через регулятор степени коррекции поступает на второй сумматор, где складывается с сигналом НЧ.

Описанная процедура осуществляет коррекцию и антишумовую обработку в горизонтальном по растру направлении (обрабатываются строки изображения). Последовательно с такой обработкой проводится, во внутрикадровом пространстве, практически аналогичная обработка в вертикальном по растру направлении

(обрабатываются столбцы). Поэтому перед устройством коррекции и антишумовой обработки в вертикальном по растру направлении введено устройство трансформации изображения, производящее поворот изображения на  $90^\circ$ . После же устройства коррекции и антишумовой обработки в вертикальном по растру направлении включено устройство обратной трансформации сигнала изображения.

Далее в пятой главе разработано программное обеспечение для моделирования метода устранения блокинг-эффекта. Алгоритм модели устройства устранения блокинг-эффекта реализован на языке Matlab. Сначала осуществляется ввод исходного изображения. Перед обработкой проверяется является ли фоновый блок элементом совокупности заданного размера. В результате проверки заполняется массив маркирующий блоки, требующие обработки. Обработка фоновых блоков осуществлялась лишь в том случае, если фоновые блоки образуют собой совокупности, площадь каждой из которых превышает размер  $3 \times 3$  блока.

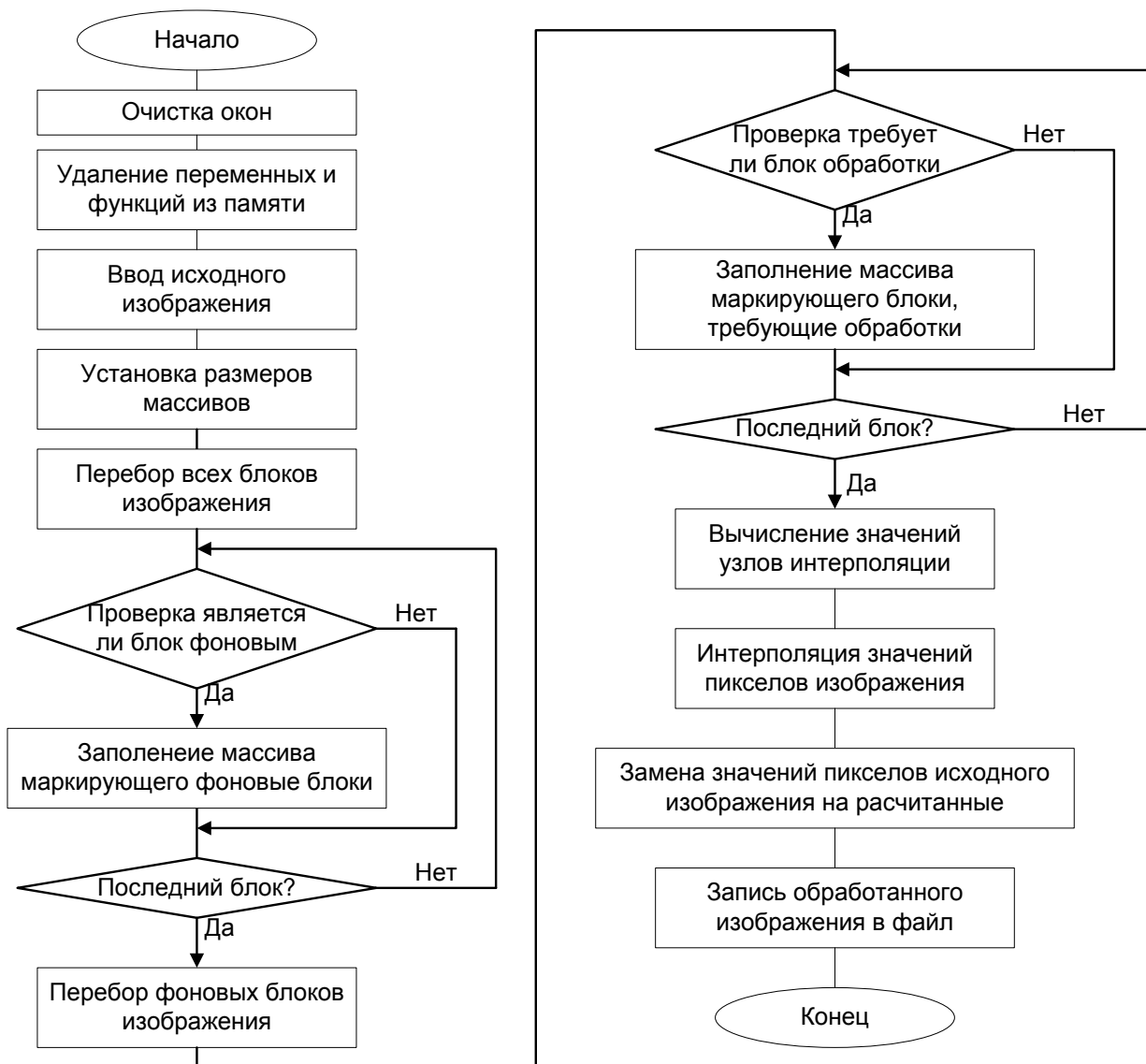


Рис. 12. Схема алгоритма устранения “блокинг-эффекта”

Затем реализуют вычисление значений узлов интерполяции и производится интерполяция значений пикселей изображения в соответствии с принципами, описанными во второй главе настоящей работы. При этом в варианте, когда используется сплайн-интерполяция, перед ее выполнением осуществляется разбиение совокупностей отобранных ранее блоков на прямоугольные области. Далее значения пикселей изображения заменяются рассчитанными величинами. Обработанное изображение записывается в файл. Алгоритм устранения “блокинг-эффекта” изображен на рис.12.

В диссертации приведены результаты работы алгоритма устранения блокинг-эффекта. Использованное тестовое изображение «Лес» отличается большой заметностью искажений “блочности” после сжатия по методу JPEG. После соответствующей обработки и сплайн-интерполяции “блочность” была устранена полностью. При использовании кусочно-квадратичной интерполяции “блочность” стала менее заметной. Следует, однако,

отметить, что сплайн-интерполяция дает лучший результат лишь на прямоугольных фоновых областях.

**В заключении** приводятся основные выводы по результатам выполненной работы

**В приложении** приведен текст программы, моделирующей устранение “блокинг-эффекта”.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Выявлено, при проведенном анализе сжатия спектра сигналов изображений по стандарту MPEG-2, наличие в пределах отдельных блоков и их последовательностей нелинейных, перекрестного типа, искажений спектров независимых составляющих структуры соответствующих фрагментов изображения, которые резко расширяют набор дефектов, возникающих в структуре сигнала изображения блока при увеличении степени сжатия.
2. Обоснована необходимость селекции и идентификации при проведении коррекции искажений и дефектов изображений в системах цифрового вещательного телевидения в текущем сигнале совокупностей смежных блоков, имеющих эквивалентную структуру изображений, и реализации в их пределах алгоритмов коррекции, учитывающих общую для последних специфику изображения.
3. Разработан новый метод устранения “блокинг-эффекта” на этапе декодирования сигналов изображений в системах цифрового вещательного телевидения, спецификой функционирования которого является селекция в структуре изображения совокупностей блоков, имеющих заданный (по верхнему пределу) градиент сигнала изображения в пределах блока и двумерная параллельная интерполяционная обработка совокупностей отсчетов, обеспечивающая высокую эффективность подавления искажений фона в протяженных (более двух блоков) в пространстве кадра участках с соответствующим весовым падением заметности указанного эффекта.
4. Разработаны методы и устройства коррекции линейных и нелинейных искажений сигналов изображений в системах цифрового телевидения, обеспечивающие увеличение степени сжатия спектра.
5. Разработан алгоритм текущего контроля сквозной частотной характеристики радиоканала в системах цифрового ТВ по стандарту DVB-T, обеспечивающий адаптивное изменение точности оценки в зависимости от условий функционирования.
6. Предложена методика, которая позволяет анализировать влияние различных вариантов амплитудных характеристик усилителей на параметры спектра выходного сигнала и с учетом полученных результатов обеспечивать заданные к ним требования



7. Реализованы программное обеспечение, моделирующее процесс устранения “блокинг-эффекта”, и экспериментальные исследования разработанного метода реализации интерполяционной реставрации структуры фона при декодировании сигналов изображений в системах цифрового телевидения.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Безруков В.Н. Комаров П.Ю. Линейные искажения сигналов изображений в системах цифрового телевидения со сжатием по стандарту MPEG-2 // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава: Тез. докл. Книга 1. – М.: МТУСИ, 2004. – С. 125.
2. Комаров П.Ю. Коррекция искажений информационных сигналов в системах вещательного цифрового телевидения // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава: Тез. докл. Книга 1. – М.: МТУСИ, 2004. – С. 125-126.
3. Безруков В.Н., Комаров П.Ю., Чуксин В.В. Объективная оценка искажений изображений в системах цифрового вещательного телевидения и видеоинформатики // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава: Тез. докл. Книга 1. – М.: МТУСИ, 2005. – С. 110-111.
4. Комаров П.Ю. Анализ характеристик линейных телевизионных устройств // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава: Тез. докл. Книга 1. – М.: МТУСИ, 2006. – С. 131-132.
5. Комаров П.Ю. Коррекция нелинейных искажений изображений в системах цифрового вещательного телевидения // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава: Тез. докл. Книга 1. – М.: МТУСИ, 2006. – С. 137-138.
6. Комаров П.Ю., Ланчиков П.Н. Особенности передачи информации в системе DVB-T // Труды МТУСИ: Сборник статей. – М.: МТУСИ, 2004. – С. 84-90.
7. Комаров П.Ю. Способ коррекции и антишумовой обработки в системах телевидения // Труды МТУСИ: Сборник статей. – М.: МТУСИ, 2006. – С. 76-89.
8. В.Н. Безруков, И.В. Власюк, П.Ю. Комаров. Мультипликативные амплитудные искажения оптического отображения видеоинформации в пространство кадра при телевизионном контроле // Метрология и измерительная техника в связи. – 2005. – №5(47). – С.24 – 28.

9. Безруков В.Н., Кардонская И.Л., Комаров П.Ю. Алгоритм оценки текущего состояния амплитудно-частотной характеристики сквозного радиоканала // Деп. в ЦНТИ «Информсвязь» от 26.05.2006 № 2275 – св. 2006. – С. 2-14.
10. Комаров П.Ю. Многолучевой прием в DVB-T // Деп. в ЦНТИ «Информсвязь» от 26.05.2006. № 2275 св. 2006. – С. 15-24.
11. Комаров П.Ю. Линейные искажения в системах телевидения // Деп. в ЦНТИ «Информсвязь» от 26.05.2006 № 2275 – св. 2006. – С. 25-40.
12. Безруков В.Н., Рабинович А.В., Комаров П.Ю. Способ преобразования цифрового сигнала изображения и устройство для его реализации // Пат. 2287909 МПК H04 №7/28.
13. Балобанов А.В., Власюк И.В., Комаров П.Ю. Коррекция пространственных искажений сигнала изображения в системах цифрового телевидения // Инфокоммуникационные системы.– 2006.– № 4.– С. 46–51.
14. Безруков В.Н., Власюк И.В., Комаров П.Ю. Цифровое ТВ: специфические искажения // Мобильные системы.– 2006. – № 11– С. 28-33.